

**RE-DISEÑO DE LA CÁMARA DE ENFRIAMIENTO DE MOLDURA DEL ÁREA DE
REPARACIÓN DE MOLDES DE CRISTAR S.A.S**

JUAN JOSÉ RESTREPO TORO

1087552265

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA, RISARALDA

ENERO DE 2018

**RE-DISEÑO DE LA CÁMARA DE ENFRIAMIENTO DE MOLDURA DEL ÁREA DE
REPARACIÓN DE MOLDES DE CRISTAR S.A.S**

JUAN JOSÉ RESTREPO TORO

1087552265

**PRÁCTICA CONDUCENTE A TRABAJO DE GRADO
INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR:

PhD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA, RISARALDA**

ENERO DE 2018

Nota de aceptación:

Firma del director del proyecto

Pereira, enero de 2018.

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuela Herminda. Ella me enseñó desde niño que todo lo que me propusiera a hacer en la vida, lo hiciera con todo mi amor.

A mi madre, quien a lo largo de toda mi vida me ha aportado la mayoría de los principios y valores que me describen como la persona que soy hoy en día. Su apoyo ha sido incondicional y fundamental a lo largo de todo este proceso.

A mi padre, porque ha sido para mí un ejemplo de que el trabajo continuo y el aprendizaje autodidacta en el día a día son altas fuentes de conocimiento.

A mi hermano y colega, porque me ha inspirado a sentir un gran amor por la ciencia y me ha demostrado que la disciplina y la constancia son esenciales en los escenarios académicos. Además, ha sido un claro ejemplo de que cuando se tienen metas claras, solo basta con tener iniciativa, disposición y una actitud positiva para alcanzarlas a pesar de los inconvenientes.

A mi tío Nelson, porque su apoyo y acompañamiento han sido piezas claves e incondicionales en mi proceso de formación como profesional y como persona. Él me ha inspirado a soñar en grande, a confiar en mis propias capacidades y a enfrentar cada día con una actitud llena de positivismo.

A toda mi familia, amigos y personas que en algún momento han hecho parte de mis días, porque en cada uno de los instantes y escenarios que he compartido con ellos, aportaron diferentes enseñanzas que complementan el ser humano que soy en la actualidad.

A cada uno de ustedes... ¡Infinitas gracias!

Juan J. Restrepo Toro.

AGRADECIMIENTOS

A los docentes que me orientaron a lo largo de mi proceso de formación ingenieril. A la Universidad Tecnológica de Pereira por brindarme todas las herramientas y espacios de su campus, necesarios para desarrollar todas las actividades que facilitaron convertirme en profesional.

A Mauricio Ossa Lee, Coordinador del área de Reparación de moldes, quien más que mi jefe directo, fue mi compañero a lo largo de toda mi práctica en Cristar S.A.S. Me quedo con los conocimientos técnicos que compartió conmigo y hoy es una referencia para mí de lo que es ser un buen líder.

Agradezco también a todo el personal de Reparación de moldes, me hicieron sentir como un integrante más de este gran equipo. A todo el personal de Cristar S.A.S, porque a lo largo de estos seis meses, me hicieron sentir parte de esta valiosa familia y me enseñaron la importancia de la comunicación y del trabajo en equipo. De cada uno de ellos aprendí que lo más importante en el ámbito laboral es ser una persona llena de humanidad.

Sinceros agradecimientos también al ingeniero José Luis Tristanco por la voluntad de dirigir este proyecto y su compromiso con el mismo.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. JUSTIFICACIÓN.....	10
3. OBJETIVOS.....	11
3.1 Objetivo General	11
3.2 Objetivos Específicos	11
4. MARCO REFERENCIAL	12
4.1 Planta Cristar	12
4.2 Área de Reparación de Moldes	15
4.3 Elementos que conforman el equipo de moldura del proceso tipo Prensa.....	15
4.3.1 Macho	15
4.3.2 Tubo de enfriamiento.....	16
4.3.3 Válvula levanta fondo:.....	17
4.3.4 Arandela de prensado:.....	17
4.3.5 Molde:	18
4.5 Fundamentos de transferencia de calor	19
4.5.1 Transferencia de calor por conducción	19
4.5.2 Transferencia de calor por convección	20
4.5.3 Transferencia de calor por conducción a través de un cilindro hueco	21
4.5.4 Transferencia de calor en superficies extendidas.....	23
4.5.5 Modelo matemático para las aletas en general	24
4.5.6 Modelo matemático para aletas de sección uniforme	26
4.5.7 Desempeño de una aleta.....	28
4.5.8 Eficiencia de una aleta	29
4.5.9 Eficiencia global de un arreglo de aletas	29
4.5.10 Transferencia de calor por radiación.....	30
4.5.11 Flujo alrededor de un cilindro.....	31
5. INSUMOS Y EQUIPO UTILIZADO	33
5.1 Cámara termográfica Thermopro TP8	33
5.2 Cámara de enfriamiento actual.....	33
5.2.1 Ventilador axial.....	36
5.3 Molde referencia P-0609	36

6. METODOLOGÍA Y ENSAYOS	39
6.1 Curva de enfriamiento actual del molde P-0609	39
6.2 Cálculo de transferencia de calor para el molde P-0609 en la nueva configuración cámara de enfriamiento	42
6.2.1 Velocidad del aire en la nueva configuración de la cámara de enfriamiento	43
6.2.2 Número de Reynolds (Re)	46
6.2.3 Cálculo del coeficiente convectivo del aire en la nueva configuración de la cámara de enfriamiento	46
6.2.4 Temperaturas iniciales del molde P-0609	47
6.2.5 Tiempo de enfriamiento de cada sección del molde P-0609	48
6.2.6 Validación de la mejora propuesta	57
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
9. BIBLIOGRAFÍA	60
10. ANEXOS	61

1. INTRODUCCIÓN

Cristar S.A.S es una compañía ubicada en la ciudad de Buga, Valle del Cauca. Se encuentra afiliada a Owens Illinois, firma estadounidense especializada en la producción de envases de vidrio. Por su parte, Cristar S.A.S se dedica a la elaboración continua de productos en cristalería, tales como vasos, copas, jarras, platos, entre otros.

La compañía se encuentra distribuida en diferentes áreas que posibilitan el cumplimiento de las tareas necesarias para la obtención de sus productos. Entre estas se encuentra REPARACIÓN DE MOLDES, área de servicio encargada de que todos los equipos de moldura cumplan con los requerimientos mínimos antes de pasar al área de formación de obras, tales como el maquinado para obtener las características dimensionales solicitadas, el correcto alistamiento del equipo de moldura según su referencia y su acabado superficial a partir del pulido.

El proceso de pulido se realiza con la puesta en revolución de la moldura en un banco diseñado para tal fin, mediante la ayuda de una mordaza que sujeta el elemento para ser pulido con lijas de diferentes tamaños de grano, según conveniencia. Este procedimiento se ejecuta cada que una nueva referencia de cristalería está próxima a ingresar al área de formación o en caso de que la moldura llegue al taller con defectos superficiales, después de haber sido bajada del área de formación.

1.1 Planteamiento del problema

Cuando los machos y los moldes se encuentran a temperatura ambiente, estos pueden ser instalados en el banco de pulido inmediatamente, a diferencia de ocasiones en las que la moldura está recientemente bajada de las máquinas formadoras. Cuando se da del último caso, la moldura debe pasar previamente por una cámara de enfriamiento, en la que se logra disipar el calor de las piezas mediante transferencia de calor por convección forzada.

Actualmente el equipo de enfriamiento está conformado por una cámara elaborada en lámina metálica con una puerta en su cara frontal, por donde se introducen las piezas a ser enfriadas. Además, cuenta con un ventilador de flujo axial ubicado en la cara superior de la caja, el cual inyecta aire ambiente y, un extractor en la cara posterior que posibilita evacuar el aire que va ganando temperatura a medida que pasa a través de las piezas calientes.

Si bien el principio de funcionamiento de la cámara de enfriamiento de moldura disponible en REPARACIÓN DE MOLDES es correcto (convección forzada e intercambio del aire en su interior), se ha evidenciado un cuello de botella en el proceso debido a la capacidad del equipo y la dirección en la que el aire ataca a la moldura, por lo tanto, se hace necesario un nuevo diseño que satisfaga el flujo de enfriamiento de moldura actual y, a su vez, permita generar un aporte importante al área.

2. JUSTIFICACIÓN

Cristar S.A.S cuenta actualmente con ocho líneas de producción, enumeradas desde la línea A0 hasta la A7. En cada una de ellas se realiza el cambio de todo el equipo de moldura cada que una nueva campaña entra en vigencia o, un cambio parcial por piezas de repuesto cuando se detectan defectos inherentes al estado superficial de los elementos. Cuando el cambio es parcial, la moldura afectada pasa al área de REPARACIÓN DE MOLDES para su oportuna reparación en el menor tiempo posible, con el fin de garantizar la disponibilidad de más repuestos.

Se ha evidenciado que en momentos críticos los operarios del área deben esperar hasta dos horas para que la moldura alcance una temperatura a la que se pueda iniciar el pulido sin sufrir quemaduras. Sumado a esto, en cada una de las ocho líneas trabajan en simultaneo referencias distintas, existiendo una alta probabilidad de que se requiera el pulido de varios elementos al mismo tiempo. Es en estos momentos que se encuentra la necesidad de mejorar el diseño actual de la cámara de enfriamiento, con el fin de disminuir el tiempo en el que se pueda iniciar el pulido. Se busca entonces generar un aporte importante a la eficiencia del taller de REPARACIÓN DE MOLDES.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Realizar un nuevo diseño de la cámara de enfriamiento de moldura para el área de REPARACIÓN DE MOLDES DE CRISTAR S.A.S.

3.2 Objetivos Específicos

- Calcular la capacidad de extracción de calor requerida en la cámara de enfriamiento.
- Diseñar, según la capacidad de extracción calculada, la nueva cámara de enfriamiento de moldura.
- Calcular el nuevo tiempo de enfriamiento y compararlo con los obtenidos en la actualidad.
- Validar si la propuesta de la nueva configuración para la cámara de enfriamiento realmente haría un aporte significativo al taller de Reparación de moldes.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 Planta Cristar

Cristar S.A.S se dedica a la fabricación de cristalería. Actualmente la empresa posee ocho líneas de producción, las cuales corresponden a cada grupo de máquinas y operaciones secuenciales donde el vidrio fundido se pasa a través de un proceso de formación, moldeo y enfriamiento, para producir productos de cristalería que conforman la vajilla en general [1].

Las ocho líneas de producción están conformadas por dos grupos, según el tipo de máquina que da la forma a las piezas:

- Líneas de máquinas prensas.
- Líneas de máquinas Hartford 28, conocidas también como H-28.

Cada línea de producción se identifica por la letra A y un número consecutivo de acuerdo a su ubicación física en la planta. Las líneas de producción con máquinas H-28 son las A0, A2, A3, A5 y A7; y las líneas de producción con máquinas prensa son las A1, A4 y A6. La producción de todas las líneas se rige por el programa de producción de la planta, el cual se realiza con base en los pedidos de los clientes [1].

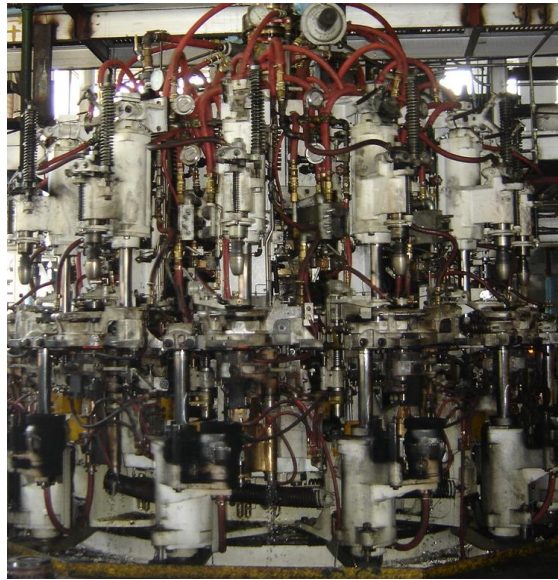
A continuación, se hace una breve descripción de las formas de operación de los dos tipos de máquina:

Máquinas H-28: Las máquinas H-28 son máquinas que forman las obras a partir del soplado del vidrio. En Cristar S.A.S existen cuatro de 12 estaciones y una de 18, las cuales giran alrededor de su eje central. Las obras son formadas de forma automática y a velocidades elevadas y que por la complejidad de su forma geométrica, no pueden fabricarse en una máquina tipo Prensa.

Cada estación de las máquinas H-28 está conformado por el siguiente equipo de moldura:

- Macho.
- Boquillera.
- Pre-molde.
- Molde.

De los anteriores, los elementos que comúnmente se hacen pasar por la cámara de enfriamiento son los machos y los pre-moldes.



Fuente: Archivo Cristar.

Figura 1. Máquina Formadora H-28.

Máquinas Prensa: Las máquinas tipo prensa permiten la obtención de las obras a partir del prensado del vidrio al interior de una cavidad llamada molde, con la ayuda de un elemento prensador llamado macho.

El equipo de moldura de las máquinas tipo Prensa se compone por:

- Macho.
- Tubo de enfriamiento.
- Válvula levanta fondo.
- Arandela de prensado.
- Molde.

Antes de pasar al proceso de pulido, la temperatura de los elementos se disminuye en la cámara de enfriamiento. Además, debido a que los equipos de moldura tipo Prensa tienen mayor volumen que los de las máquinas H-28, el proceso de enfriamiento se hace más crítico para estos.

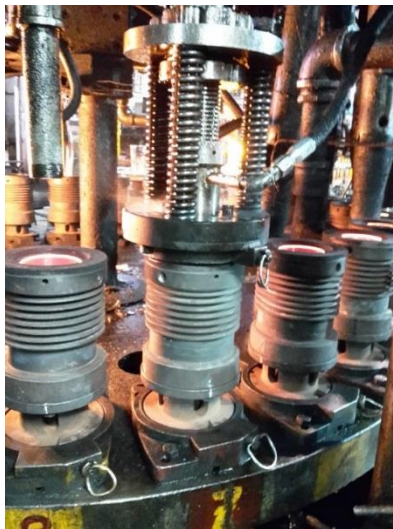
En la actualidad Cristar S.A.S cuenta con dos tipos de máquinas Prensa:

- Doble gota: en estas se realiza el prensado con dos machos trabajando simultáneamente. Se cuenta con dos de ellas en la planta.
- Gota sencilla: haciendo referencia al prensado obtenido por un único macho. Solo unas de las tres Prensas trabajan con este tipo de prensado.

A su vez, se cuenta con dos tipos de proceso:

- Molde cerrado: proceso de prensado bajo el cual trabajan las dos máquinas a doble gota. En este, el vidrio se dispone al interior de cada molde para ser prensado y extraído posteriormente de la cavidad a partir de dos elementos conocidos como levanta fondos y sacadores de vacío.
- Molde abierto: correspondiente a uno de los dos posibles procesos que puede manejar la máquina Prensa de gota sencilla, ya que esta también permite elaborar el prensado mediante molde cerrado.

El proceso de molde abierto se ejecuta en las referencias en las que la extracción de las obras es más compleja, debido a su forma geométrica. A diferencia del proceso de molde cerrado, la extracción se realiza mediante la apertura del molde y con la posterior actuación de sacadores de vacío.



Fuente: Archivo Cristar.

Figura 2. Máquina Formadora Prensa.

4.2 Área de Reparación de Moldes

El área de reparación de moldes es la encargada del almacenamiento, mantenimiento, medición, reparación y alistamiento de todos los equipos de moldura de ambos tipos de proceso de la planta (tipo H-28 y Prensa). Es vital que los equipos que van a comenzar campaña se encuentren bajo las tolerancias permisibles y/o solicitadas por el líder de cada línea de producción.

Actualmente el área cuenta con 32 miembros, distribuidos en los cargos de: certificadores, lavadores, acarreadores, ajustadores (Prensa y H-28), torneros, operarios de empaste, Coordinador de Reparación de Moldes y un aprendiz universitario.

Las pérdidas de eficiencia y tiempos de producción en los que el área de Reparación de Moldes ha tenido alguna participación, son los causados por defectos en las obras de cristalería [1]. Dichos defectos se corrigen a partir del pulido de la moldura, proceso que se ve directamente afectado por el tiempo que toma enfriar las piezas en la cámara de enfriamiento de moldura.

4.3 Elementos que conforman el equipo de moldura del proceso tipo Prensa

A continuación, se hará una descripción de los elementos que componen el equipo de moldura del proceso tipo Prensa, el que será objeto de estudio del nuevo diseño de la cámara de enfriamiento, ya que, como se mencionó anteriormente, el enfriamiento se hace más crítico para estos equipos de moldura en comparación del usado en el proceso H-28.

4.3.1 Macho: El macho le da la forma final en su cavidad interior a la obra. En prensa, los materiales de los machos son de acero inoxidable de diferentes referencias (SS431 – SS304 – SS310), sumado a una capa de soldadura aplicada mediante proyección térmica en toda la línea de vidrio, la cual incrementa la dureza y resistencia a la abrasión de la superficie. Con lo anterior, se logra una reducción del tiempo en reparaciones y cambios de la pieza por desgaste superficial.



Fuente: Archivo Cristar

Figura 3. Macho tipo prensa.

4.3.2 Tubo de enfriamiento: Su principal función es la de regular la temperatura en el macho. Su diseño depende de la cavidad interna del macho, ya que se ensambla en su interior y, de la obra que se vaya a realizar.



Fuente: Archivo Cristar

Figura 4. Tubos de enfriamiento del proceso prensa.

4.3.3 Válvula levanta fondo: La válvula levanta fondos es la encargada de dar el acabado final de las obras en su cara inferior. Además, permite la extracción de las piezas prensadas al interior de los moldes.



Fuente: El autor.

Figura 5. Válvulas levanta fondos proceso prensa.

4.3.4 Arandela de prensado: Las arandelas dan el acabado final de la obra en sus bordes superiores, además, guían los machos durante el prensado.



Fuente: El autor.

Figura 6. Arandela de prensado.

4.3.5 Molde: Un molde es una pieza interiormente hueca con detalles o no en su interior, la cual da la forma exterior de la obra de vidrio en el momento del prensado. Debido a que es el elemento del equipo de moldura con mayor volumen y masa, los cálculos necesarios para el desarrollo del nuevo diseño de la cámara de enfriamiento se harán teniendo en cuenta las dimensiones, el material y las propiedades térmicas de los moldes de una de las referencias denominadas Pareto.



Fuente: El autor.

Figura 7. Molde cerrado proceso tipo prensa.

A continuación se muestra un ejemplo de los moldes abiertos y cerrados:



Fuente: Autor

Figura 8. Molde cerrado y molde abierto.

4.5 Fundamentos de transferencia de calor

Debido a que el proceso que ocurre dentro de la cámara de enfriamiento está asociado a la disipación de calor desde la moldura hacia el exterior, se deben tener en cuenta algunos conceptos importantes en el área de la transferencia de calor. Con esto se logrará plantear un modelo que permita, a partir de la temperatura a la que se ingresa la moldura al equipo de enfriamiento, la velocidad del aire al interior de la cámara y una cantidad determinada de moldes, obtener un resultado aproximado de la disminución del tiempo en el tiempo enfriamiento con el re-diseño del equipo.

Con base en la aplicación práctica, en el modelo se tendrán en cuenta los mecanismos de transferencia de calor de conducción, convección forzada y radiación.

4.5.1 Transferencia de calor por conducción

Cuando en un medio sólido existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. El calor transmitido por conducción es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx multiplicado por el área A a través del cual se transfiere [2], es decir:

$$q_k \propto A_k \frac{dT}{dx} [1]$$

El flujo de calor depende de la conductividad térmica k que es la propiedad física del medio, luego:

$$q_k = -kA_k \frac{dT}{dx} [2]$$

Donde:

q_k : transferencia de calor por conducción $[W]$.

k : conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$.

A_k : área de la sección transversal de transferencia de calor $[m^2]$.

dT : delta de temperatura [K].

dx : espesor del material [m].

4.5.2 Transferencia de calor por convección

Cuando un fluido se pone en contacto con una superficie sólida a una temperatura distinta, el proceso resultante de intercambio de energía térmica se denomina transferencia de calor por convección [2]. Hay dos tipos de procesos de convección:

- Convección libre o natural.
- Convección forzada.

En el primer caso, la fuerza motriz procede de la diferencia de densidad en el fluido que resulta del contacto con una superficie a diferente temperatura y da lugar a fuerzas ascensionales. En el segundo caso una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie a una temperatura mayor o inferior que la del fluido [2]. En cualquiera de los dos casos, la transferencia de calor está dada por:

$$q_h = hA_s(T_s - T_\alpha) [3]$$

Donde:

q_h : transferencia de calor por convección [W].

h : coeficiente convectivo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$.

A_s : área de superficie en contacto con el fluido [m^2].

T_s : temperatura de la superficie en contacto con el fluido [K].

T_α : temperatura del fluido en contacto con el sólido [K].

4.5.3 Transferencia de calor por conducción a través de un cilindro hueco

Ahora, la transferencia de calor para un cilindro hueco se da en su dirección radial [3] y, la tasa de transferencia está determinada por la ecuación:

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [4]$$

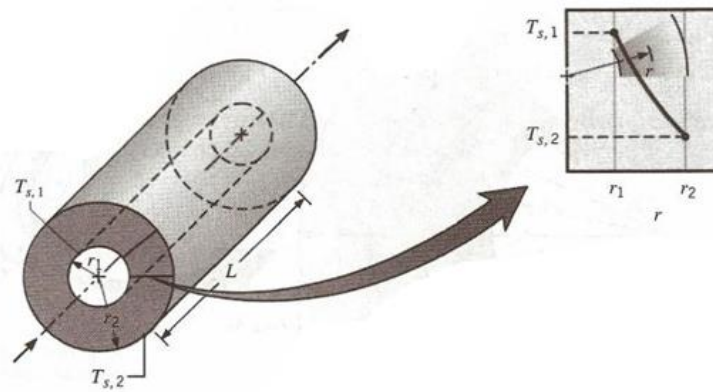


Figura 9. Transferencia de calor por conducción a través de un cilindro hueco.

Donde:

q_r : transferencia de calor por conducción a través de un cilindro en dirección radial [W].

L : longitud del cilindro [m].

k : conductividad térmica del material del cilindro $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$.

$T_{s,1}$: temperatura superficial 1 (temperatura pared interior, en la Figura 9) [K].

$T_{s,2}$: temperatura superficial 2 (temperatura pared exterior, en la Figura 9) [K].

r_1 : radio pared interior [m].

r_2 : radio pared exterior [m].

La ecuación [3] describe la transferencia de calor a través de una pared cilíndrica, sin tener en cuenta la interacción del cilindro con el fluido al interior y exterior del mismo. Dicha interacción se representa a continuación:

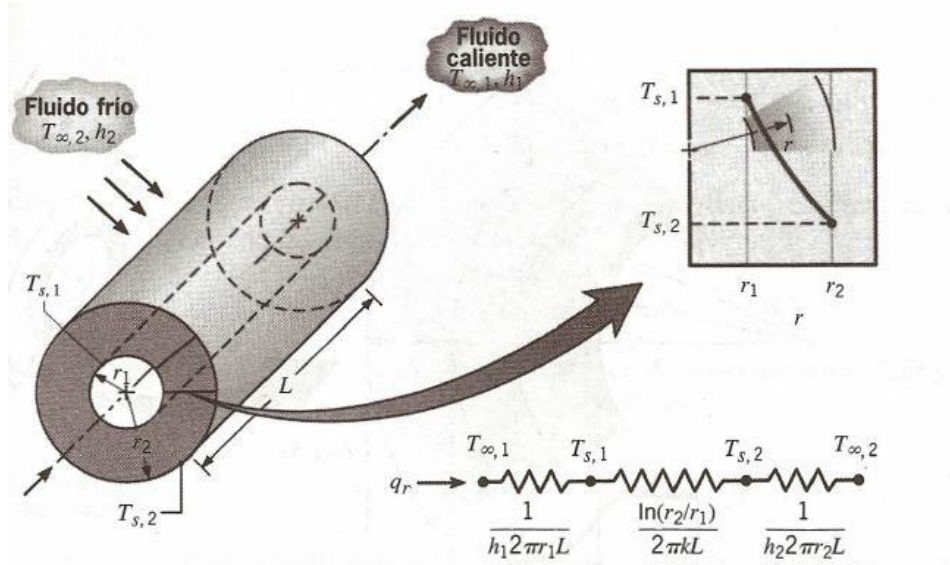


Figura 10. Transferencia de calor a través de un cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie [3].

Entonces, teniendo en cuenta la interacción del cilindro con el fluido en su interior y el que lo rodea [3], se tiene que:

$$q_r = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi k L} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2}} \quad [5]$$

Donde:

q_r : transferencia de calor por conducción a través de un cilindro en dirección radial $[W]$.

L : longitud del cilindro $[m]$.

k : conductividad térmica del material del cilindro $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$.

$T_{\alpha,1}$: temperatura del fluido al interior del cilindro $[K]$.

$T_{\alpha,2}$: temperatura del fluido al exterior del cilindro $[K]$.

h_1 : coeficiente convectivo interior $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$.

h_2 : coeficiente convectivo exterior $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$.

4.5.4 Transferencia de calor en superficies extendidas

La frase *superficie extendida* se usa normalmente con referencia a un sólido que experimenta transferencia de energía por conducción dentro de sus límites, así como transferencia de energía por convección (y/o radiación) entre sus límites y los alrededores [3]. Esta superficie extendida se denomina como *aleta* y, su aplicación permite el aumento de la tasa de transferencia de calor en los cuerpos. En la Figura 11 se muestran diferentes geometrías implementadas para el diseño de las aletas:

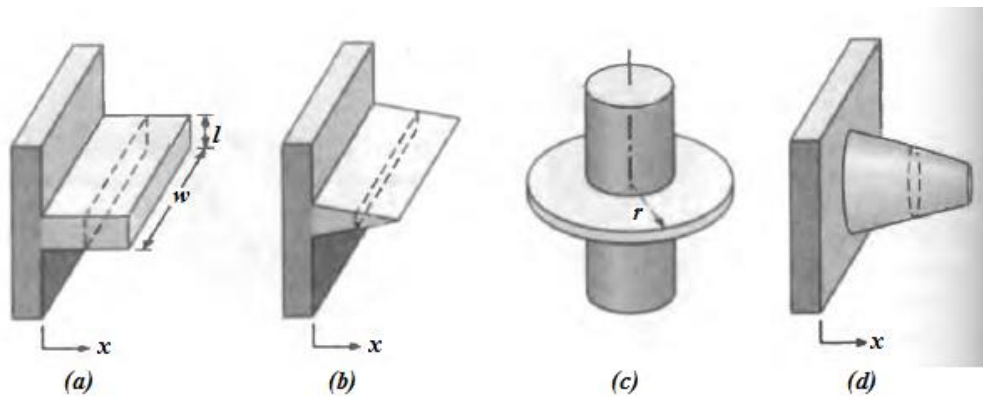


Figura 11. Geometrías de aletas utilizadas comúnmente [3].

El análisis de transferencia de calor a través de las aletas se hace necesario en el cálculo de transferencia de energía total de la moldura, ya que parte de su geometría está conformada por

dichas superficies. Se enfocará el análisis en la configuración (c) de la Figura 11, conocida como *aleta anular*, similar a la forma geométrica de los moldes disponibles en Cristar S.A.S.

Una aleta anular es aquella que une de forma circunferencial a un cilindro y, su sección transversal, varía con el radio desde la línea central del cilindro. Este tipo de aleta tiene sección transversal rectangular y constante, cuya área se expresa como un producto del espesor de la aleta t y de la circunferencia $2\pi r$ [3].

4.5.5 Modelo matemático para las aletas en general

Para el modelamiento matemático de las aletas, se considerarán los siguientes supuestos:

- Régimen estacionario: $\frac{dT}{dt} = 0$.
- No hay generación de calor en la aleta: $\dot{E}_{gen} = 0$.
- Conductividad térmica del material constante.
- Coeficiente convectivo de transferencia de calor constante y uniforme a través de la aleta.

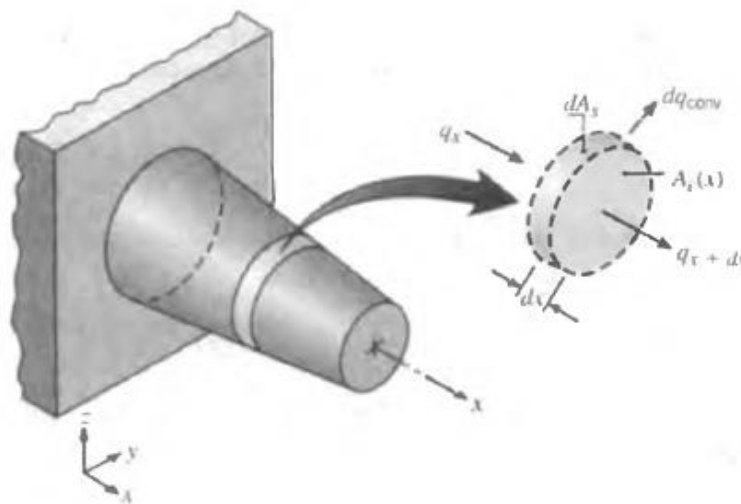


Figura 12. Balance de energía para una superficie extendida [3].

Al aplicar balance de energía sobre la superficie mostrada en la Figura 12, se tiene que:

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv} [6]$$

Donde:

q_x : transferencia de calor por conducción a través del elemento diferencial. Este término es similar al presentado en la ecuación [2], entonces:

$$q_k = q_x$$

$$q_x = -kA_c \frac{dT}{dx} [7]$$

Siendo A_c el área de la sección transversal que varía con x .

Ahora, como la transferencia de calor en q_{x+dx} , se expresa como:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx$$

Se sigue que:

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) dx [8]$$

Además, la transferencia por convección a través del elemento diferencial, está dada por:

$$dq_{conv} = h dA_s (T - T_\alpha) [9]$$

Siendo dA_s el área superficial del elemento diferencial.

Finalmente, después de manipular matemáticamente las expresiones [7], [8] y [9] y, reemplazando en la ecuación [6], se obtiene:

$$\frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) - \frac{h dA_s}{k} (T - T_\alpha) = 0 [10]$$

O,

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h dA_s}{k} \right) (T - T_\alpha) = 0 [11]$$

La expresión [11] determina la ecuación de energía en las superficies extendidas. Su solución define la distribución de temperaturas en el elemento y, que en conjunto con la ecuación [7], permite conocer la transferencia de calor a lo largo del eje x de la aleta [3].

4.5.6 Modelo matemático para aletas de sección uniforme

El término A_s de la ecuación [11], en una aleta de sección uniforme, se define como el producto del perímetro P de la sección por la distancia desde la base de la aleta hasta x. Entonces:

$$A_s = Px \quad [12]$$

Además, como la distribución geométrica de las aletas anulares presentes en los moldes objetos de estudio tienen sección transversal constante, se tiene que $dA_c/dx = 0$ y $dA_s/dx = P$. Por lo tanto, ecuación [11] queda como:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \left(\frac{hP}{kA_c} \right) (T - T_\alpha) = 0 \quad [13]$$

Para simplificar la forma de la ecuación [13], se transforma la variable dependiente en el término conocido como exceso de temperatura $\theta(x) = T(x) - T_\alpha$.

Entonces, la ecuación [13] queda como:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad [14]$$

Siendo:

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c} \quad [15]$$

Al resolver la ecuación [13], correspondiente a una ecuación diferencial lineal de segundo orden, cuya solución se da como:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad [16]$$

Se deben determinar entonces dos condiciones de frontera de la aleta para resolver la ecuación [16]. Dichas condiciones se exponen a continuación:

1. Para la base de la aleta, se tiene que la temperatura es θ_b , entonces:

$$\theta_{(0)} = \theta_b \text{ [17]}$$

2. La segunda condición de frontera que corresponde a la punta de la aleta en $x = L$, siendo L la longitud total de la aleta, corresponde a cualquiera de cuatro posibles condiciones físicas [3], las cuales se especifican a continuación:

- Caso A: consideración de transferencia de calor desde el extremo de la aleta.
- Caso B: corresponde a la suposición de que la pérdida de calor convectiva en el extremo de la aleta es insignificante, en cuyo caso el extremo se trata como adiabático.
- Caso C: donde la temperatura en el extremo de la aleta es conocida.
- Caso D: conocido como aleta infinitamente larga, donde la temperatura del extremo tiende a la temperatura del medio T_α .

A continuación, en la Tabla 1, se presenta un resumen de cada una de las anteriores soluciones:

Caso	Condición de la aleta en $x = L$	Distribución de temperaturas $\frac{\theta}{\theta_b}$	Transferencia de calor de la aleta q_f
A	Transferencia de calor por convección: $h\theta(L) = -k d\theta/dx _{x=L}$	$\frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$	$M \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$
B	Adiabática: $d\theta/dx _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}$	$M \tanh mL$
C	Temperatura establecida: $\theta(L) = \theta_L$	$\frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL}$	$M \frac{(\cosh mL - \theta_L/\theta_b)}{\sinh mL}$
D	Aleta infinita ($L \rightarrow \infty$): $\theta(L) = 0$	e^{-mx}	M
$\theta = T - T_\alpha$ $\theta_b = \theta(0) = T_b - T_\alpha$			
$m^2 = hP/kA_c$ $M = \sqrt{hPkA_c} \theta_b$			

Tabla 1. Distribución de temperaturas y pérdidas de calor para aletas de sección transversal uniforme [3].

Para el caso en estudio, se harán los cálculos basados en el Caso B, partiendo de la suposición de que la pérdida de calor convectiva en los extremos de las aletas es insignificante.

4.5.7 Desempeño de una aleta

Las aletas se instalan en un cuerpo con el fin de aumentar la transferencia de calor por convección a través de este. Para evaluar la efectividad de la aleta ε_f , se presenta la siguiente relación:

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{h A_{c,b} \theta_b} \quad [18]$$

Donde el término $A_{c,b}$ es la sección transversal en la base de la aleta.

4.5.8 Eficiencia de una aleta

Otra medida del desempeño térmico de la aleta la proporciona la *eficiencia de la aleta* η_f . Se tiene que la rapidez máxima a la que una aleta puede disipar energía es la rapidez que existiría si toda la superficie de la aleta estuviera a la temperatura de la base [3]. Entonces:

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{q_f}{h A_f \theta_b} \quad [19]$$

Donde:

A_f : área de la superficie de la aleta.

Ahora, para aletas rectas de sección transversal uniforme y extremo adiabático, se obtiene:

$$\eta_f = \frac{M \tanh mL}{h PL \theta_b} = \frac{\tanh mL}{mL} \quad [20]$$

4.5.9 Eficiencia global de un arreglo de aletas

La ecuación [19] describe la eficiencia para una sola aleta, pero se presta interés a determinar la eficiencia de un juego de aletas y de la superficie base a la que se unen dichos elementos. La eficiencia global de un arreglo de aletas [3], se define como:

$$\eta_o = \frac{q_t}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{q_t}{h A_t \theta_b} \quad [21]$$

Donde q_t es la transferencia de calor total del área de la superficie A_t , asociada con las aletas y la parte expuesta de la base, definida como:

$$A_t = N A_f + A_b \quad [22]$$

Siendo A_f el área superficial de cada aleta, N el número total de aletas y A_b el área de la base a la que se encuentran unidas las superficies extendidas.

Teniendo en cuenta que la transferencia de calor máxima se logra cuando la temperatura de las aletas se mantuviera a la temperatura de sus bases, la transferencia de calor por convección de estos elementos y de las superficies sin aletas, se expresa como:

$$q_t = N \eta_f h A_f \theta_b + h A_b \theta_b \quad [23]$$

Donde el coeficiente de convección h se supone equivalente para las superficies con y sin aletas y η_f es la eficiencia de una sola aleta [3]. Entonces:

$$q_t = h A_t \left[1 - \frac{N A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \right] \theta_b \quad [24]$$

La ecuación 24 será de utilidad más adelante para determinar el flujo de calor total en una de las secciones de los moldes en estudio.

4.5.10 Transferencia de calor por radiación

Cuando se tiene un cuerpo que está a una temperatura más alta que la de los alrededores, existirá un intercambio energético que no involucra algún medio de transporte, lo que se conoce como vacío. Dicho intercambio se da hasta que se logra un balance energético entre el cuerpo y sus alrededores, debido a una disminución en la energía interna almacenada por el sólido y es una consecuencia directa de la emisión de radiación térmica desde la superficie. Además, la superficie también absorberá la radiación originada desde los alrededores, sin embargo, si $T_s > T_{alr}$, la transferencia de calor neta por radiación $q_{rad,net}$ será desde la superficie, la cual se enfriará hasta alcanzar T_{alr} [3].

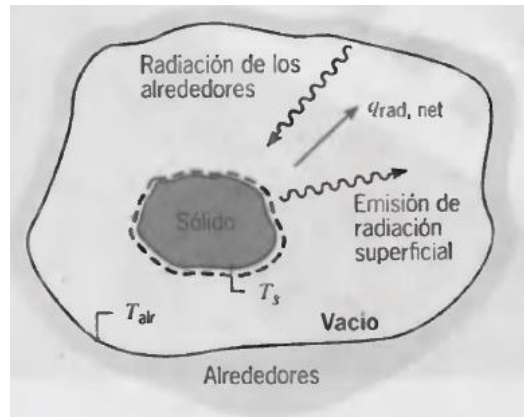


Figura 13. Enfriamiento por radiación de un sólido [3].

La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto o cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie por unidad de tiempo q_r [2], dada por la ecuación:

$$q_r = \sigma A_r T^4 \text{ [25]}$$

Siendo σ una constante conocida como la constante de Stefan-Boltzmann [3]:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Además, se tiene que A_r es el área superficial del cuerpo negro, dada en m^2 .

La transferencia de energía neta de un cuerpo que irradia a un recinto que lo rodea completamente, considerando dicho recinto también como un cuerpo negro, es posible calcularse mediante la expresión:

$$q_r = \sigma A_r (T_s^4 - T_{alr}^4) \text{ [26]}$$

Debe advertirse que las temperaturas de la expresión [26] son dadas en grados Kelvin. Además, el análisis por radiación para los moldes en estudio, se hará partiendo del supuesto de que dichos cuerpos y sus alrededores son cuerpos negros.

4.5.11 Flujo alrededor de un cilindro

Para determinar el coeficiente convectivo alrededor de la moldura, se debe hacer un cálculo previo de las propiedades de las que depende esta constante.

- Número de Reynolds (Re): el número de Reynolds se define como un valor adimensional que describe el tipo de régimen bajo el cual se mueve un fluido, cuya naturaleza puede ser de flujo laminar o turbulento.

Para un cilindro circular, el número de Re está definido como [3]:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \text{ [27]}$$

Donde:

V : velocidad del fluido [m/s].

D : diámetro del cilindro [m].

ν : viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

- Número de Nusselt (Nu): El número de Nusselt es el coeficiente de transmisión de calor adimensional, aparece debido a la convección. Este número provee una medida de la convección sobre la superficie [4] y está dado por:

$$Nu = \frac{hD}{k_\alpha} = C Re^m Pr^{1/3} \quad [28]$$

El valor k_α de la ecuación [28] hace referencia a la conductividad del fluido y se puede hallar en el Anexo 1. El valor Pr presente en la misma ecuación se conoce como *número de Prandtl* y determina la relación entre la difusividad de momento (viscosidad cinemática) y la difusividad térmica [3], ambas propiedades del fluido. Entonces:

$$Pr = \frac{\nu [m^2/s]}{\alpha [m^2/s]} \quad [29]$$

Los valores Pr , ν y α se pueden hallar mediante el Anexo 1.

Ahora, las constante C y m de la ecuación [28] se determinan a partir de la Tabla 2:

Re	C	m
0,4 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,466
4000 – 40000	0,193	0,618
40000 – 400000	0,027	0,805

Tabla 2. Constantes de la ecuación [28] para un cilindro circular en flujo cruzado [3].

Por último, al determinar el valor de Nu mediante la ecuación [28], se puede encontrar el valor de h en función de la velocidad del aire, el diámetro del cilindro y las propiedades del aire a la temperatura dada.

5. INSUMOS Y EQUIPO UTILIZADO

5.1 Cámara termográfica Thermopro TP8

La cámara termográfica Thermopro TP8 es desarrollada dentro del paquete de infrarrojos (IR) más avanzado disponible en el momento, integrando múltiples tecnologías nunca antes utilizadas en la industria. Dicha cámara es otra ingeniosa solución ofrecida por Guide IR, para termógrafos profesionales en todo el mundo [6].

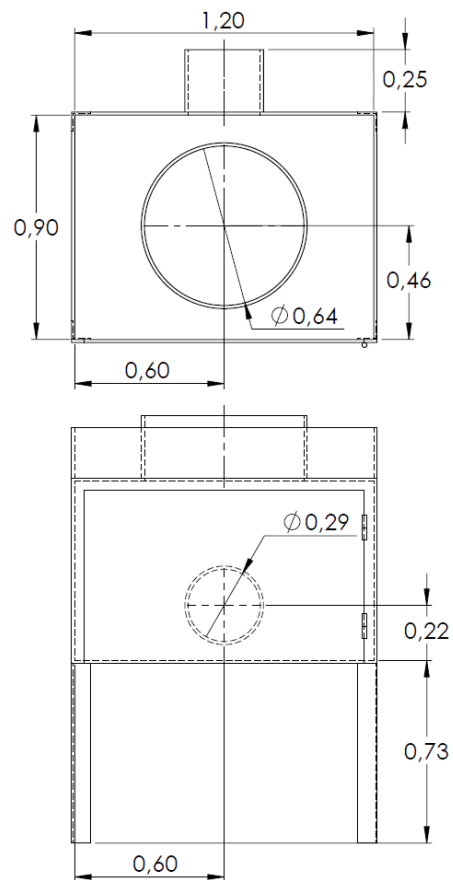


Fuente: El autor.

Figura 14. Cámara termográfica Thermopro TP8 [6].

5.2 Cámara de enfriamiento actual

Se presenta a continuación el Plano 1, en el que se relacionan las cotas de la configuración actual de la cámara de enfriamiento:

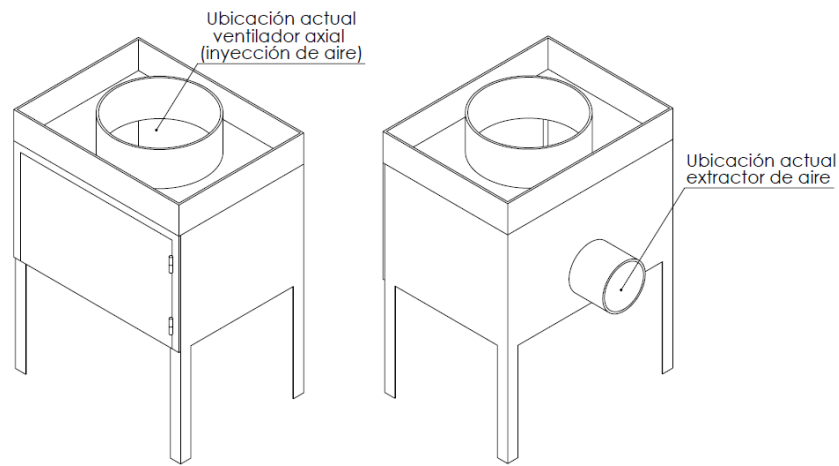


Fuente: El autor.

Plano 1. Cotas relevantes del montaje actual de la cámara de enfriamiento. Medidas en metros.

Escala 1:10.

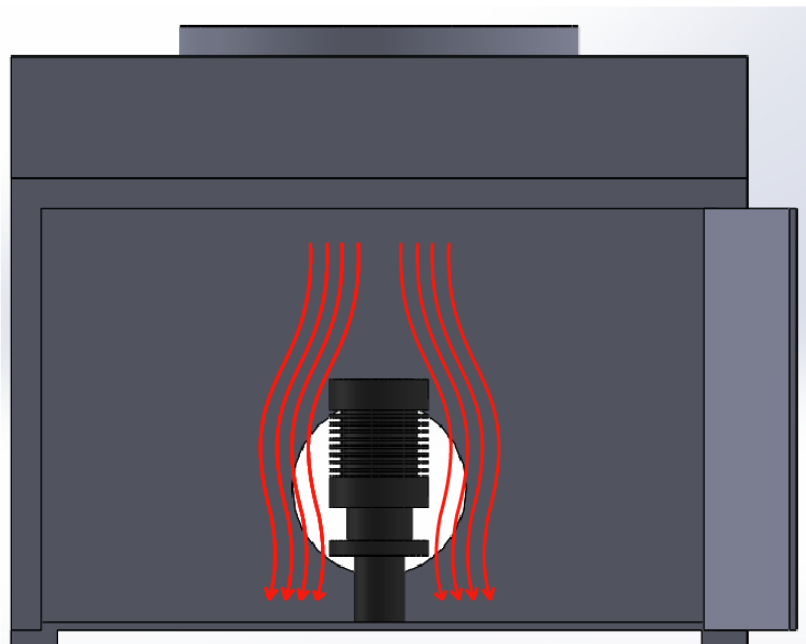
Además, se muestra un esquema isométrico del montaje actual:



Fuente: El autor.

Figura 15. Dibujo isométrico del montaje actual de la cámara de enfriamiento.

Por último, la Figura 16 da una idea del flujo actual del aire a través del molde. En él se puede visualizar que las aletas disponibles en la moldura no están siendo aprovechadas, ya que el flujo de aire a través del molde no se encuentra en flujo cruzado, según la bibliografía [3].



Fuente: El autor.

Figura 16. Representación del flujo actual del aire a través del molde.

5.2.1 Ventilador axial

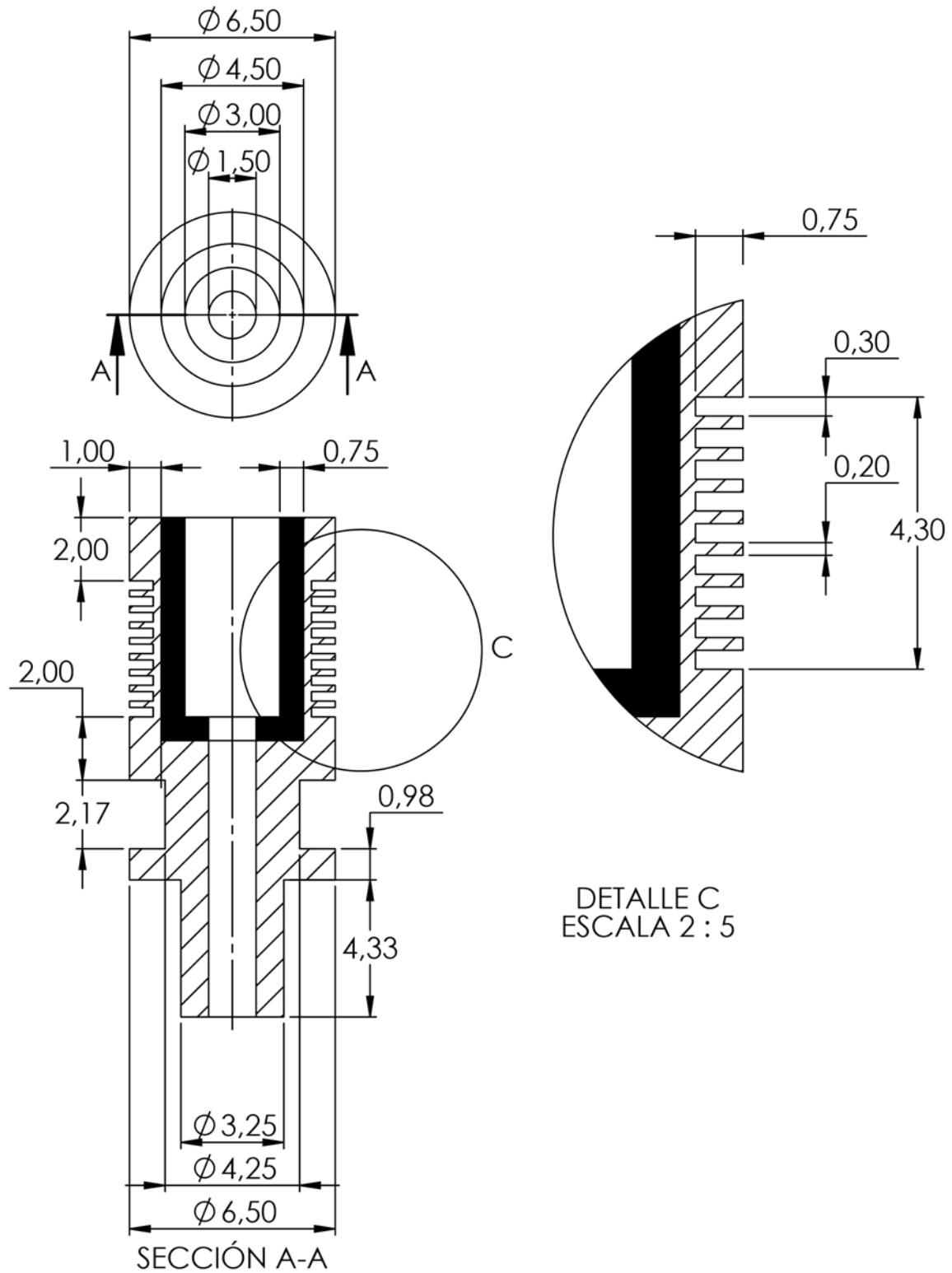
En los ventiladores axiales el aire fluye a través del ventilador en dirección axial. Estos ventiladores transportan grandes cantidades de aire (caudales) con pequeños aumentos de presión, siendo apropiados para aplicaciones que requieran disipar el calor producido en los equipos [4].

En el montaje actual se cuenta con un ventilador axial marca *Siemens* [4] de referencia 2CC2 504 5YB6_STD, cuya descripción técnica está disponible en el Anexo 3. Allí aparecen tabuladas características, entre las cuales se encuentra el caudal Q [m^3/s], necesario para realizar cálculos posteriores, cuyo valor corresponde a:

$$Q = 2,93 \frac{m^3}{s}$$

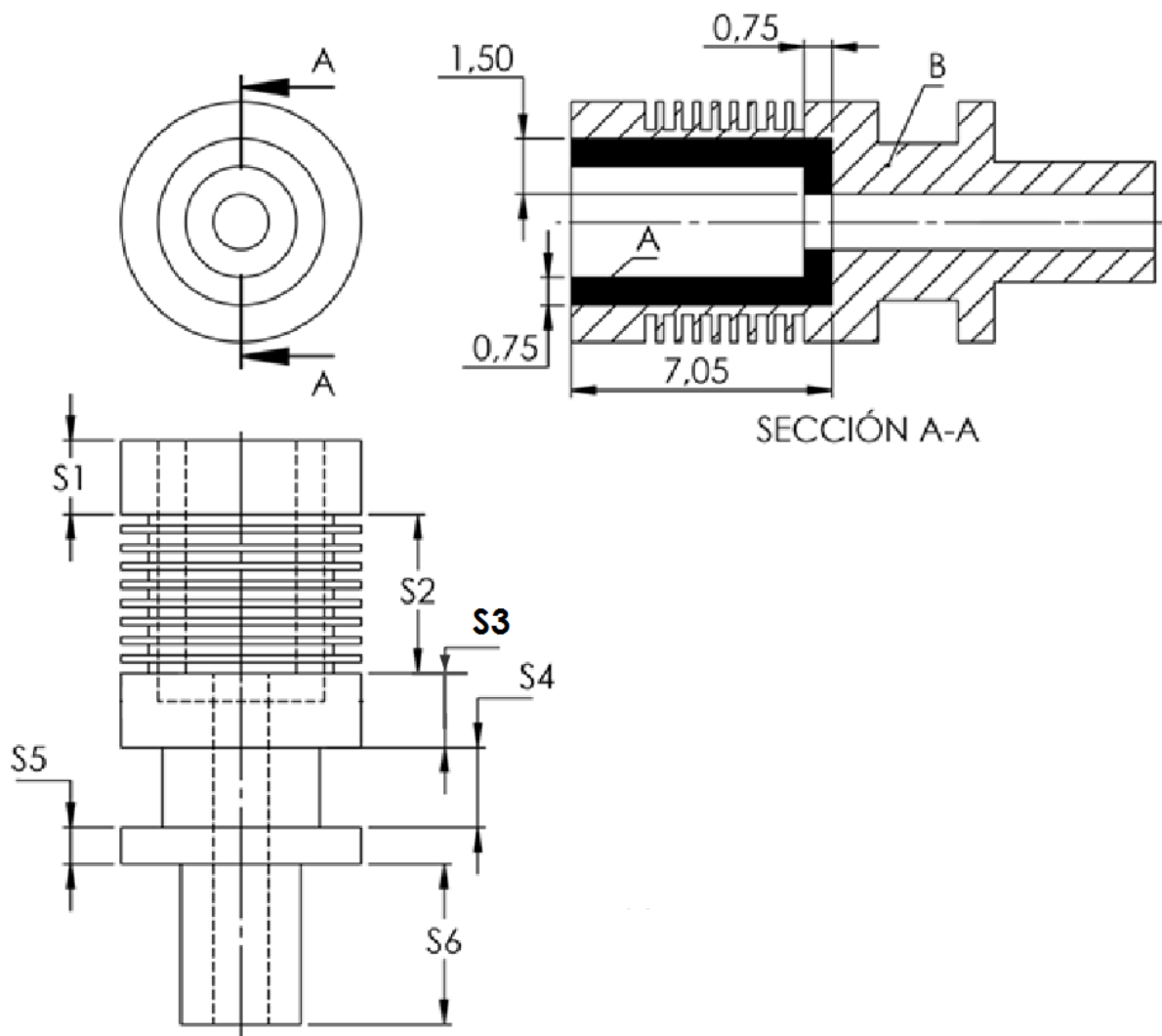
5.3 Molde referencia P-0609

Con el fin de realizar los cálculos de transferencia de calor para la moldura P-0609, se debe contar con la distribución geométrica de la pieza. Por políticas internas de Cristar S.A.S, que indican que no es posible hacer pública la información inherente a sus planos, se presenta a continuación dos planos esquemáticos que muestran de manera aproximada la geometría y las piezas que conforman el molde:



Fuente: El autor.

Plano 2. Acotación del molde P-0609. Medidas en pulgadas. Escala 1:5.



Fuente: El autor.

Plano 3. Distribución por secciones del molde P-0609. Medidas en pulgadas. Escala 1:5.

Los moldes tipo Prensa de Cristar S.A.S están conformados por dos partes, como se puede apreciar en los planos 2 y 3. En el Plano 2 se especifican las piezas A y B, correspondientes al inserto y la carcasa de la moldura respectivamente, ambas construidas en fundición nodular, material cuyas propiedades térmicas se pueden consultar en el Anexo 2.

6. METODOLOGÍA

6.1 Curva de enfriamiento actual del molde P-0609

Con el objetivo de conocer el tiempo necesario para enfriar el molde P-0609 usando la configuración actual de la cámara de enfriamiento, se procedió a realizar la medición de la temperatura máxima del molde P-0609 cada 10 minutos, haciendo uso de la cámara termográfica. Con los datos obtenidos, se dibujó la curva de $T[^\circ\text{C}]$ vs $t[\text{s}]$. En esta curva se puede observar el comportamiento del enfriamiento, además, conocer el tiempo estimado que tomó el molde en estudio para alcanzar una temperatura adecuada para su manipulación.

Las tomas se realizaron el 15 de diciembre de 2017, arrojando los siguientes resultados:

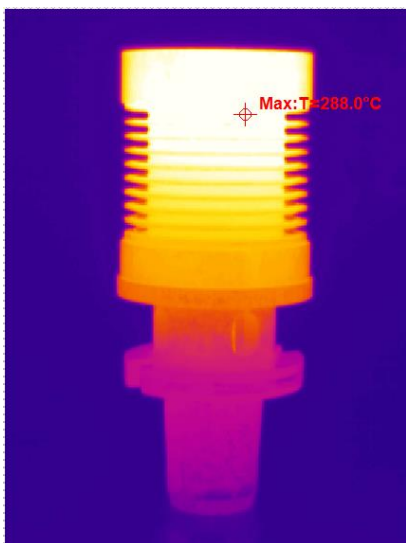


Figura 17. Temperatura máxima: 288 °C.
Hora: 10:40 am.

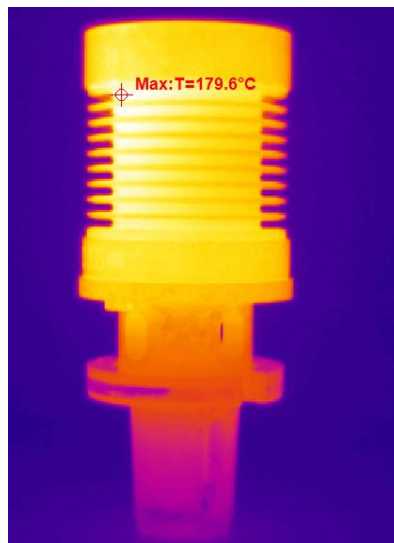


Figura 18. Temperatura máxima: 179,6 °C.
Hora: 10:50 am.

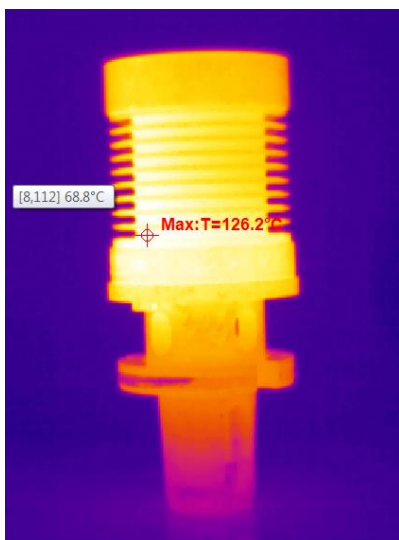


Figura 19. Temperatura máxima: 126,2 °C.

Hora: 11:00 am.

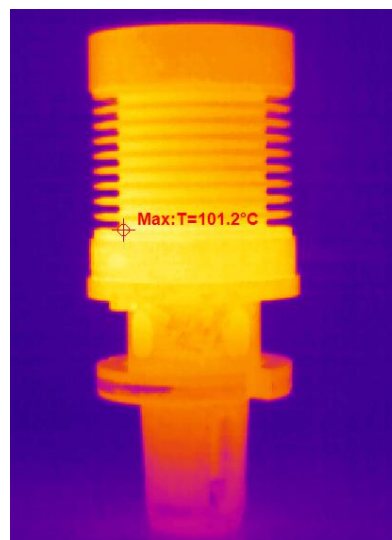


Figura 20. Temperatura máxima: 101,2 °C.

Hora: 11:10 am.

Fuente: El autor.

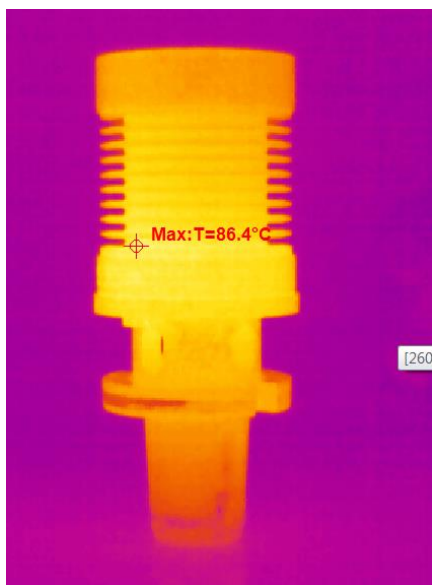


Figura 21. Temperatura máxima: 86,4 °C.

Hora: 11:20 am.

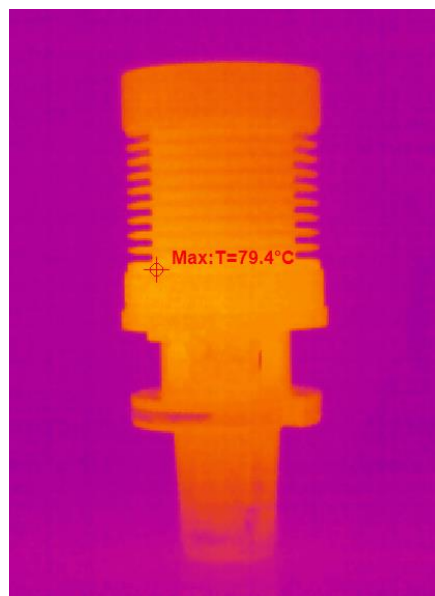


Figura 22. Temperatura máxima: 79,4 °C.

Hora: 11:30 am.

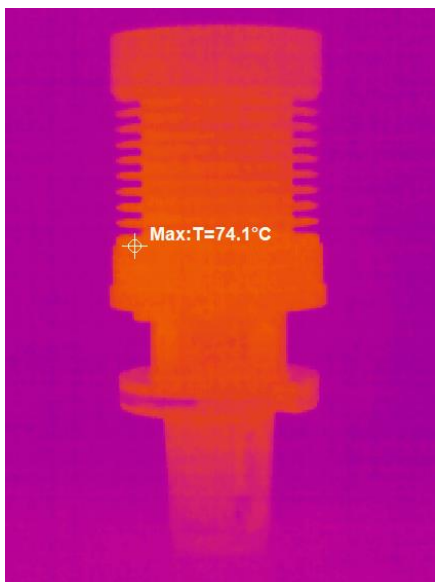


Figura 23. Temperatura máxima: 74,1 °C.

Hora: 11:40 am.

Fuente: El autor.

Basado en las recomendaciones del señor Jadier Uribe, uno de los ajustadores de moldura tipo Prensa, se estableció como temperatura apta para iniciar el proceso de pulido un valor de 74,1 °C. Dicho valor, según la Figura 23, se obtuvo justo una hora después de iniciar el proceso de enfriamiento en el equipo disponible actualmente en el taller de Reparación de moldes.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Hora	Tiempo [s]	Temperatura [°C]
10:40 AM	0	288
10:50 AM	600	179,6
11:00 AM	1200	126,2
11:10 AM	1800	101,2
11:20 AM	2400	86,4
11:30 AM	3000	79,4
11:40 AM	3600	74,1

Tabla 3. Resultados obtenidos durante el enfriamiento en la configuración actual del equipo de enfriamiento de moldura.

El Gráfico 1 muestra el comportamiento de la variación de temperatura respecto al tiempo, a partir de los datos tabulados en la Tabla 3:

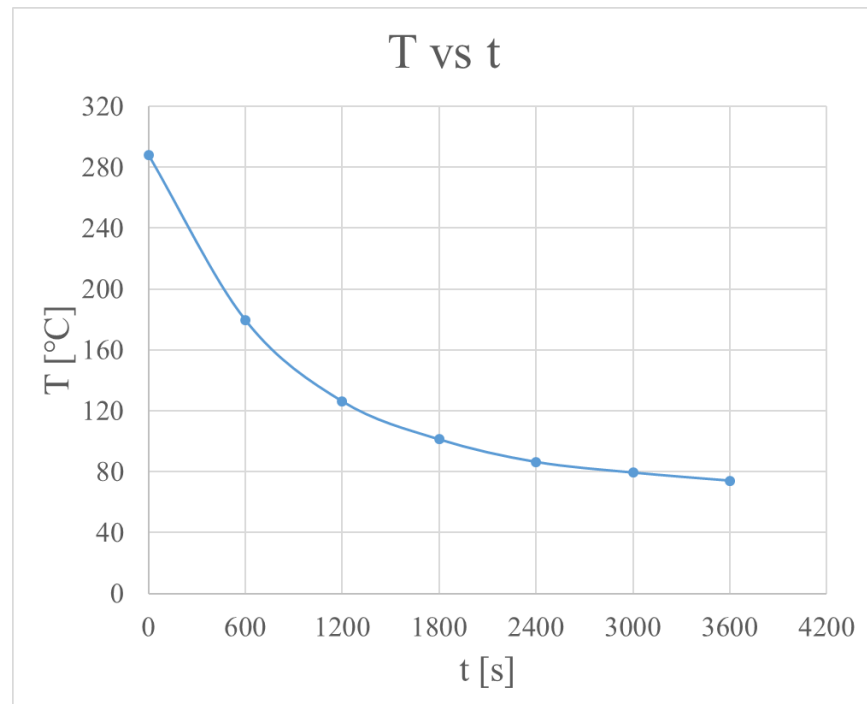


Gráfico 1. Curva T vs t, usando la configuración actual de la cámara de enfriamiento.

6.2 Cálculo de transferencia de calor para el molde P-0609 en la nueva configuración cámara de enfriamiento

A continuación, se procede a realizar el procedimiento matemático para encontrar la energía térmica disipada por el molde P-0609, a partir de la implementación de los fundamentos de transferencia de calor expuestos en el numeral 2.4. Con el fin de mostrar detalladamente dichos cálculos, se irá analizando cada una de las secciones representadas en el Plano 2, en el que se muestra esquemáticamente la distribución geométrica del molde compuesto por seis secciones, enumeradas desde la sección S1 hasta la S6.

6.2.1 Velocidad del aire en la nueva configuración de la cámara de enfriamiento

La propuesta de una nueva distribución del aire al interior de la cámara de enfriamiento del taller de Reparación de moldes, surge a partir de buscar el flujo cruzado a través de la moldura, ya que como se mostró en la Figura 16, el actual diseño de la cámara de enfriamiento no está diseñada teniendo en cuenta este concepto. La nueva configuración del equipo de enfriamiento permitiría aprovechar en mayor medida las aletas disponibles en la moldura y aumentaría el área efectiva del paso del aire a través de esta.

El nuevo diseño parte del diámetro del ducto necesario para la instalación del inyector de aire, es decir, el ventilador axial *Siemens* de referencia 2CC2 504 5YB6_STD, cuya ficha técnica se adjunta en el Anexo 3. En el Plano 1 se puede observar que es necesario un diámetro de 0,64 m para realizar el montaje de este equipo. Entonces, el área A_α del ducto es:

$$A_\alpha = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,64 \text{ m})^2 = 0,32170 \text{ m}^2$$

Ahora, el caudal a través de un ducto de aire [5] está definido por:

$$Q = V A_\alpha \text{ [30]}$$

Donde:

Q : caudal del aire a través del ducto, correspondiente a $2,93 \text{ m}^3/\text{s}$, según el Anexo 3.

V : velocidad del aire a través del ducto.

A_α : área del ducto por el que fluye el aire.

Entonces, a partir de la ecuación [30], la velocidad del aire en la configuración actual de la cámara de enfriamiento es:

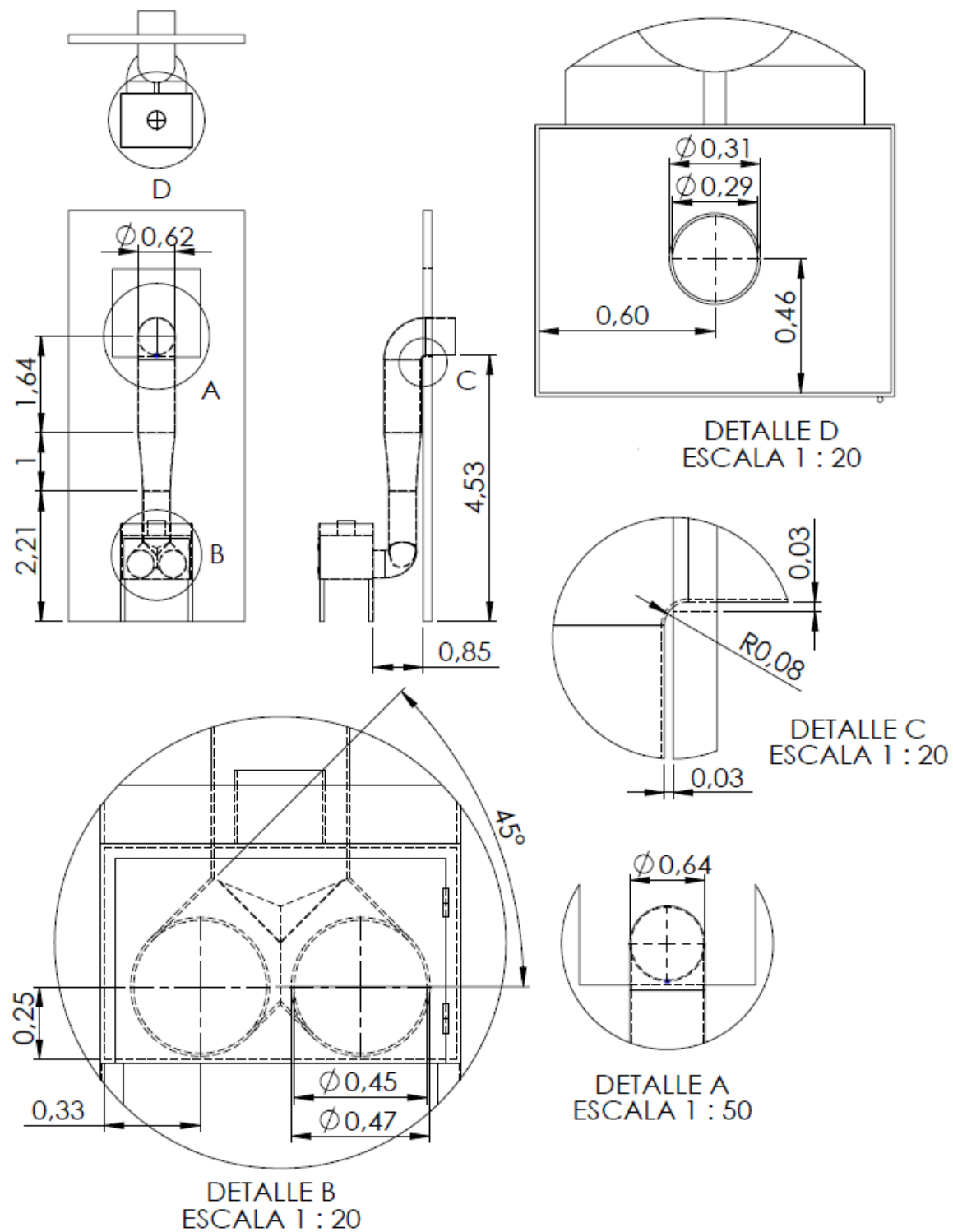
$$V = \frac{Q}{A_\alpha} = \frac{2,93 \text{ m}^3/\text{s}}{0,32170 \text{ m}^2} = 9,108 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La nueva inyección de aire propone que el mismo volumen de aire suministrado por el ventilador se distribuya en dos secciones iguales, por lo tanto, por cada sección fluiría la mitad del caudal total, correspondiente a:

$$V_{\alpha} = \frac{Q}{\frac{A_{\alpha}}{2}} = \frac{2,93 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{0,32170 \text{ m}^2}{2}} = 18,216 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El término V_{α} equivale a la velocidad del aire a través de cada una de las dos nuevas secciones del ducto, duplicando la velocidad del fluido de la configuración original.

En el Plano 4 se muestra la propuesta para la nueva configuración de la cámara de enfriamiento:



Fuente: El autor.

Plano 4. Propuesta de la nueva configuración para la cámara de enfriamiento. Medidas en metros. Escala 1:100.

6.2.2 Número de Reynolds (Re)

Este número adimensional se calcula con los resultados obtenidos en la sección anterior. Para cada una de las dos nuevas secciones, se tiene que:

$$Re = \frac{\rho V_{\alpha} D}{\mu} = \frac{V_{\alpha} D}{\nu} [27]$$

Siendo D el diámetro del molde expuesto a flujo de aire cruzado. Además, se toma ν como la viscosidad cinemática a temperatura ambiente, ya que se inyecta aire a esta temperatura. Entonces, según el Anexo 1:

$$\nu_{@300K} = 15,89 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

Con base en el Plano 2, se toma el diámetro exterior mayor del molde P-0609 como el más crítico, $D =$, debido a que es el que genera menos turbulencia (mayor número de Reynolds). Entonces, el número de Reynolds para el aire a través de la moldura es:

$$Re = \frac{V_{\alpha} D}{\nu} = \frac{18,216 \frac{m}{s} * 6,5 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}}}{15,89 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re = 189265$$

6.2.3 Cálculo del coeficiente convectivo del aire en la nueva configuración de la cámara de enfriamiento

A partir del valor de Reynolds calculado en la sección anterior, la expresión [28], los valores de los coeficientes C y m disponibles en la Tabla 2 y el número de Prandtl (Anexo 1), se tiene que:

$$Nu = \frac{hD}{k_{\alpha}} = C Re^m Pr^{1/3} [28]$$

Donde:

$$C_{@Re=189265} = 0,027$$

$$m_{@Re=189265} = 0,805$$

$$Pr_{@300K} = 0,707$$

$$Nu = 0,027 * 189265^{0,805} 0,707^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 426$$

Ahora, la ecuación [28] también relaciona el número de Nusselt como:

$$Nu = \frac{hD}{k_{\alpha}} [28]$$

Donde $k_{\alpha} = 26,3 * 10^{-3} \frac{W}{m K}$, correspondiente al coeficiente conductivo del aire a temperatura ambiente (Anexo 1).

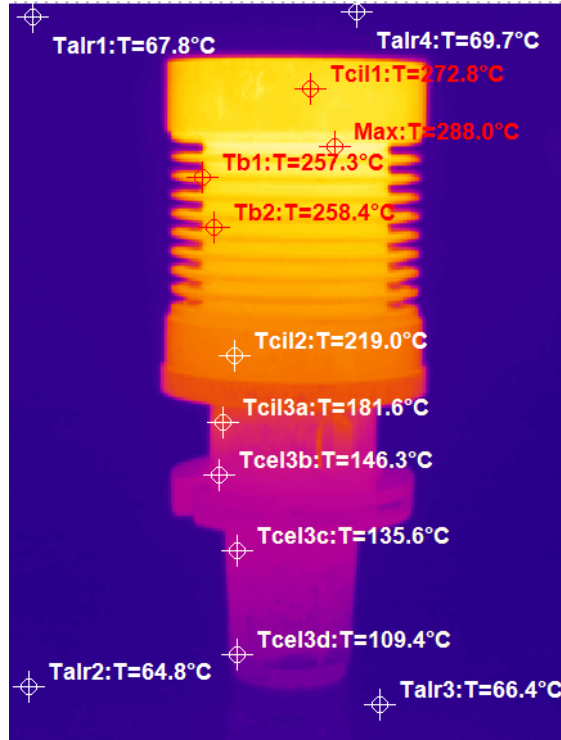
Entonces, el coeficiente convectivo alrededor del molde P-0609, mediante el flujo de aire con la nueva configuración de la cámara de enfriamiento, teniendo en cuenta el diámetro más crítico de la pieza a enfriar, es:

$$h = \frac{Nu k_{\alpha}}{D} = \frac{426 * 26,3 * 10^{-3} \frac{W}{m K}}{6,5 in * \frac{0,0254 m}{1 in}}$$

$$h = 67,83 \frac{W}{m^2 K}$$

6.2.4 Temperaturas iniciales del molde P-0609

A continuación, en la Figura 24, se presentan las temperaturas superficiales exteriores del molde P-0609, recién se baja de la máquina formadora de obras para su correspondiente pulido:



Fuente: El autor.

Figura 24. Temperaturas de las diferentes secciones del molde P-0609.

6.2.5 Tiempo de enfriamiento de cada sección del molde P-0609

Con el objetivo de encontrar el tiempo de enfriamiento de cada sección de la moldura, debe hacerse un análisis por transferencia de calor de cada una de ellas. Al determinar la tasa de transferencia de calor y, conociendo la masa del material, el calor específico y las temperaturas del material y sus alrededores, se puede encontrar el tiempo de enfriamiento [7] así:

$$Q [W] = \frac{q [J]}{t[s]} = \frac{m [kg] * c [\frac{J}{kg K}] * (T_{inicial} - T_{final})[K]}{t [s]} \quad [30]$$

Donde:

$q [J]$: calor disipado del material.

$m [kg]$: masa de cada sección.

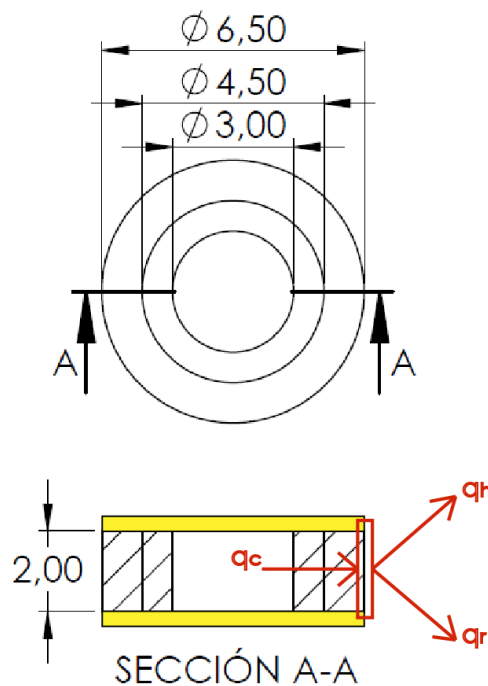
$c [\frac{J}{kg K}]$: calor específico del material.

$T_{inicial} [K]$: temperatura inicial superficial de cada sección.

$T_{final} [K]$: temperatura a la que se quiere llevar a cada sección del molde.

La expresión [30] parte de la suposición de que la temperatura en el sólido permanece uniforme, debido a que no hay cambio de fase y su geometría no presenta grandes extensiones. Por lo tanto, se tendrá un resultado estimado del tiempo de enfriamiento.

- **Sección S1:** a continuación, en la Figura 25, se muestra la geometría de la sección S1.



Fuente: El autor.

Figura 25. Análisis de transferencia de calor S1. Medidas en pulgadas.

En la figura anterior, se asumen adiabáticas las superficies superior e inferior, por lo tanto, no hay transferencia de calor a lo largo de estas, representadas con color amarillo. Partiendo de esto, al hacer balance de energía en la sección marcada con rojo, se tiene que:

$$q_c = q_h + q_r$$

Donde:

q_c : transferencia de calor por conducción.

q_h : transferencia de calor por convección.

q_r : transferencia de calor por radiación.

Ahora:

$$q_h = hA_s(T_s - T_\alpha) [3]$$

Se tiene que el valor de $h = 67,83 \frac{W}{m^2 K}$, calculado en la sección 4.2.3. Además, el valor de A_s corresponde al área expuesta a convección forzada, equivalente a:

$$A_s = 2\pi rL = 2\pi \left(3,25 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) * \left(2 \text{ in} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} \right) = 0,02635 \text{ m}^2$$

Además, la temperatura superficial de la sección S1, de acuerdo a la Figura 24, es $T_s = 272,8^\circ\text{C} = 545,8 \text{ K}$ y la temperatura del flujo que se hace pasar alrededor del molde es la del aire ambiente, siendo $T_\alpha = 300 \text{ K}$.

Entonces, la tasa de calor disipado por convección de la sección S1 es:

$$q_h = 67,83 \frac{W}{m^2 K} * 0,02635 \text{ m}^2 * (545,8 - 300) \text{ K}$$

$$q_h = 439,3 \text{ W}$$

Se procede ahora a calcular la tasa de transferencia por radiación, mediante la expresión:

$$q_r = \sigma A_r (T_s^4 - T_{alr}^4) [26]$$

La expresión [26] es válida a partir del supuesto de que el molde y sus alrededores son cuerpos negros.

Se tiene que $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$. Además, el área $A_r = 0,02635 \text{ m}^2$, siendo la misma expuesta a convección. Además, la temperatura de la superficie del recinto que contiene el molde tiene un valor de $T_{alr} = 22^\circ\text{C} = 299 \text{ K}$ y la temperatura superficial es $T_s = 272,8^\circ\text{C} = 545,8 \text{ K}$. Entonces:

$$q_r = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * 0,02635 m^2 * (545,8^4 - 299^4) K^4$$

$$q_r = 120,6 W$$

Entonces, conociendo q_h y q_r , se puede determinar la tasa de transferencia de calor total disipada, así:

$$q_T = q_c = q_h + q_r = 439,3 W + 120,6 W$$

$$q_T = 559,9 W$$

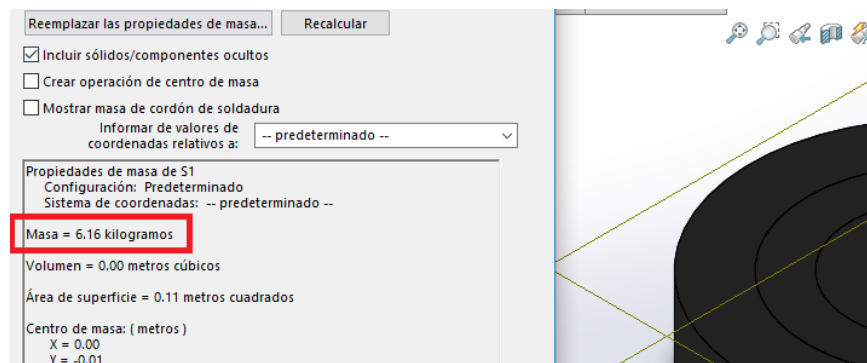
Conocida la tasa de transferencia de calor, se procede a calcular el tiempo de enfriamiento de la sección mediante la expresión [30]:

$$Q [W] = \frac{q [J]}{t [s]}$$

Operando:

$$t [s] = \frac{q [J]}{Q [W]} = \frac{q [J]}{q_T [W]} = \frac{m [kg] * c [\frac{J}{kg K}] * (T_{inicial} - T_{final}) [K]}{q_T [W]}$$

A partir de la implementación del software CAD *Solidworks*, se puede determinar la masa de la sección S1, constituida por fundición nodular, material que tiene un calor específico (Anexo 2) de $c = 446 \frac{J}{kg K}$. El resultado obtenido por el software es $m = 6,16 kg$:



Fuente: El autor.

Figura 26. Masa de la sección S1.

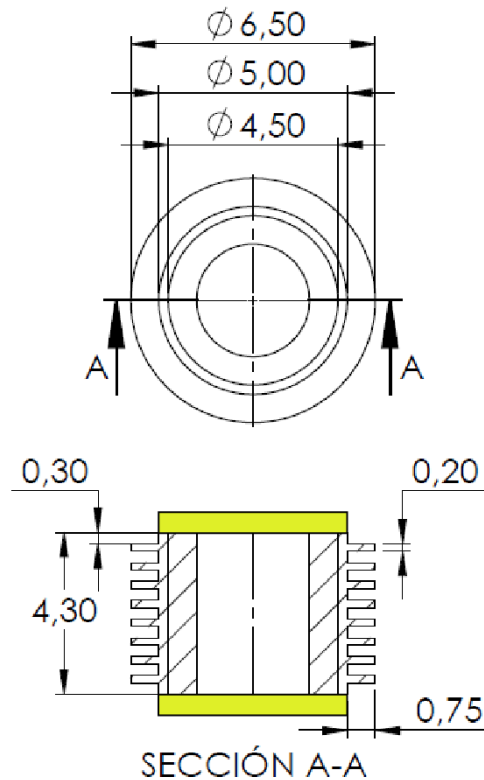
Ahora, las temperatura inicial y final se determinan con base en la temperatura superficial de la sección S1 al momento del ingreso en la cámara de enfriamiento $T_{inicial} = 272,8\text{ }^{\circ}\text{C} = 545,8\text{ }K$ (Figura 24) y la temperatura a la que se quiere llevar cada sección, correspondiente a $T_{final} = 74,1\text{ }^{\circ}\text{C} = 347,1\text{ }K$ (Figura 23). Así, el tiempo de enfriamiento es:

$$t [s] = \frac{q [J]}{Q[W]} = \frac{q [J]}{q_T[W]} = \frac{6,16\text{ }kg * 446 \frac{J}{kg\text{ }K} * (545,8 - 347,1)\text{ }K}{559,9\text{ }W}$$

$$t_{s1} = \frac{545900\text{ }J}{559,9\text{ }W} = 975\text{ }s$$

$$t_{s1} = 16,25\text{ }min$$

- **Sección S2:** a continuación, en la Figura 27, se muestra la geometría de la sección S2.



Fuente: El autor.

Figura 27. Análisis de transferencia de calor S2. Medidas en pulgadas.

En la figura anterior, se asumen adiabáticas las superficies superior e inferior, por lo tanto, no hay transferencia de calor a lo largo de estas, representadas con color amarillo. Partiendo de esto, al hacer balance de energía en la sección marcada con rojo, se tiene que, la tasa de transferencia de calor a través del total de las aletas es:

$$q_t = h A_t \left[1 - \frac{N A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \right] \theta_b \quad [24]$$

Donde:

h : coeficiente convectivo, calculado en la sección 4.2.3.

$$h = 67,83 \frac{W}{m^2 K}$$

A_f : área superficial de cada aleta, partiendo de la suposición de que la pérdida de calor convectiva en los extremos de las aletas es insignificante dada por:

$$A_f = 2\pi(3,25^2 - 2,5^2) \text{ in}^2 = 27,1 \text{ in}^2$$

$$A_f = 0,0175 \text{ m}^2$$

A_t : área total de transferencia, siendo $N = 9$ el número total de aletas y A_b el área de la base a la que se encuentran unidas las superficies extendidas.

$$A_t = N A_f + A_b \quad [22]$$

$$A_b = 2 * \pi * (2,5 \text{ in}) * (4,3 \text{ in} - 9 * 0,3 \text{ in}) = 25,13 \text{ in}^2$$

$$A_b = 0,0162 \text{ m}^2$$

Entonces:

$$A_t = 8 A_f + A_b = 8 (0,0175 \text{ m}^2) + 0,0162 \text{ m}^2$$

$$A_t = 0,1562 \text{ m}^2$$

Para aletas rectas de sección transversal uniforme y extremo adiabático, se tiene que, para cada aleta:

$$\eta_f = \frac{M \tanh mL}{h PL \theta_b} = \frac{\tanh mL}{mL}$$

Siendo m , según la Tabla 1:

$$m^2 = \frac{hP}{kA_c}$$

$$P = 2(0,75) \text{ in} + 0,20 \text{ in} = 1,7 \text{ in} = 0,04318 \text{ m}$$

$$A_c = 0,75 \text{ in} * 0,2 \text{ in} = 0,15 \text{ in}^2 = 0,000096774 \text{ m}^2$$

Conductividad térmica de la fundición gris (Anexo 2): $k = 51,9 \frac{W}{m K}$.

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA_c}} = \sqrt{\frac{67,83 \frac{W}{m^2 K} * 0,04318 \text{ m}}{51,9 \frac{W}{m K} * 0,000096774 \text{ m}^2}}$$

$$m = 24,15 \text{ m}^{-1}$$

Ahora:

$$\theta_b = \theta(0) = T_b - T_\alpha$$

Donde:

T_α : temperatura del fluido que rodea el molde [K], correspondiente a 300 K.

T_b : temperatura de la base de la aleta [K], disponible en la Figura 24, correspondiente a $257,3 \text{ }^\circ\text{C} = 530,3 \text{ K}$.

$$\theta_b = (530,3 - 300)K = 230,3 K$$

Por último, se tiene que la longitud L corresponde a la longitud de la aleta, siendo:

$$L = 0,75 \text{ in} = 0,01905 \text{ m}.$$

Entonces:

$$\eta_f = \frac{\tanh(24,15 \text{ m}^{-1} * 0,01905 \text{ m})}{24,15 \text{ m}^{-1} * 0,01905 \text{ m}}$$

$$\eta_f = 0,935$$

Finalmente, se tiene que el flujo de calor total transmitido por el arreglo de aletas es:

$$q_t = h A_t \left[1 - \frac{N A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \right] \theta_b$$

$$q_t = \left(67,83 \frac{W}{m^2 K} \right) (0,1562 m^2) \left[1 - \frac{9 * 0,0175 m^2}{0,1562 m^2} (1 - 0,935) \right] (230,3 K)$$

$$q_t = 2292 W$$

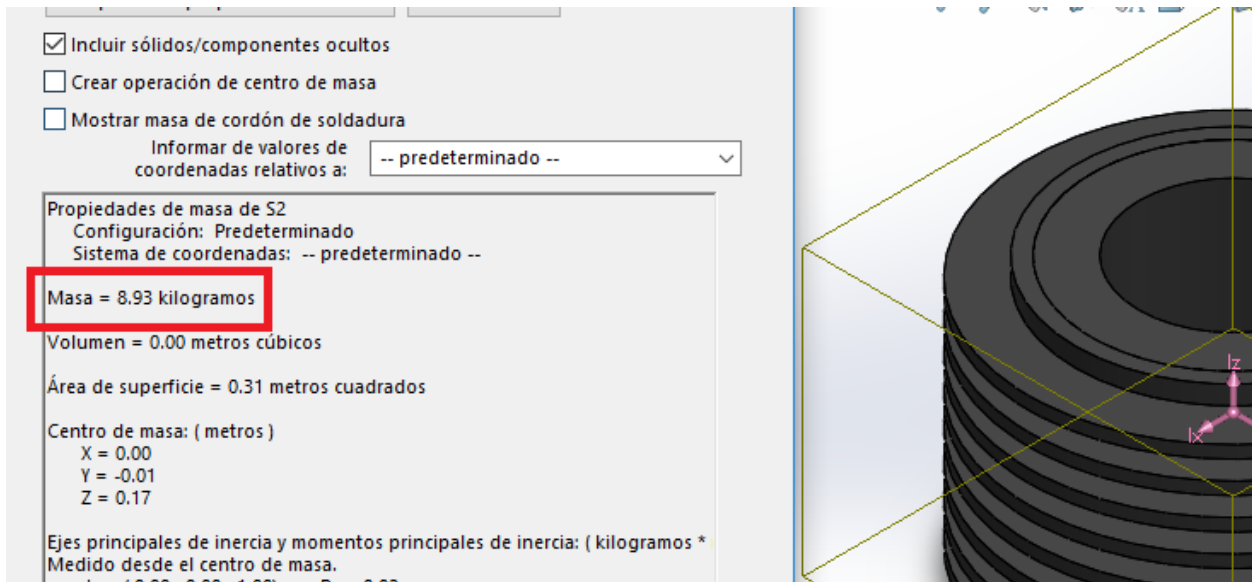
Conocida la tasa de transferencia de calor, se procede a calcular el tiempo de enfriamiento de la sección mediante la expresión [30]:

$$Q [W] = \frac{q [J]}{t[s]}$$

Operando:

$$t [s] = \frac{q [J]}{Q[W]} = \frac{q [J]}{q_t[W]} = \frac{m [kg] * c \left[\frac{J}{kg K} \right] * (T_{inicial} - T_{final}) [K]}{q_t[W]}$$

A partir de la implementación del software CAD *Solidworks*, se puede determinar la masa de la sección S2, constituida por fundición nodular, material que tiene un calor específico (Anexo 1) de $c = 446 \frac{J}{kg K}$. El resultado obtenido por el software es $m = 8,93 kg$:



Fuente: El autor.

Figura 28. Masa de la sección S2.

Ahora, las temperatura inicial y final se determinan con base en la temperatura superficial de la sección S2 al momento del ingreso en la cámara de enfriamiento $T_{inicial} = 288\text{ }^{\circ}\text{C} = 561\text{ K}$ (Figura 24) y la temperatura a la que se quiere llevar cada sección, correspondiente a $T_{final} = 74,1^{\circ}\text{C} = 347,1\text{ K}$ (Figura 23). Así, el tiempo de enfriamiento es:

$$t [s] = \frac{q [J]}{Q[W]} = \frac{q [J]}{q_T[W]} = \frac{8,93\text{ kg} * 446 \frac{J}{kg\text{ K}} * (561 - 347,1)\text{ K}}{2292\text{ W}}$$

$$t_{S2} = \frac{851917\text{ J}}{2280\text{ W}} = 372\text{ s}$$

$$t_{S2} = 6,23\text{ min}$$

- **Secciones S3, S4, S5 y S6:** Para determinar el tiempo de enfriamiento de las secciones restantes, se sigue un procedimiento análogo al de la sección S1. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$t_{S3} = 19,06\text{ min}$$

$$t_{S4} = 10,88\text{ min}$$

$$t_{S5} = 16,16 \text{ min}$$

$$t_{S6} = 6,30 \text{ min}$$

Finalmente, se presenta a continuación la Tabla 4, en la que se relaciona el tiempo estimado de enfriamiento para cada sección del molde P-0609 sometido a las nuevas condiciones de trabajo de la cámara de enfriamiento:

SECCIÓN	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO [min]
S1	16,25
S2	6,23
S3	19,06
S4	10,88
S5	16,16
S6	6,3

Tabla 4. Tiempo de enfriamiento estimado para cada sección del molde P-0609.

6.2.6 Validación de la mejora propuesta

Al confrontar los resultados obtenidos en la Tabla 3 frente a los datos tomados durante el enfriamiento del molde P-0609, registrados en la Tabla 4, se puede validar que el tiempo de enfriamiento, sometido a las condiciones de enfriamiento actuales de la cámara de enfriamiento de moldura del taller de REPARACIÓN DE MOLDES de CRISTAR S.A.S, BUGA, pasaría de 60 minutos a un tiempo estimado de 19,06 minutos, reduciendo dicho procedimiento a más de su tercera parte de duración.

Los resultados están basados en llevar la moldura de 288 °C, temperatura a la cual se ingresa el molde a la cámara de enfriamiento, hasta una temperatura de 74,1 °C, que según recomendaciones del señor Jadier Uribe, ajustador de moldura tipo Prensa, es la ideal para iniciar el proceso de pulido sin sufrir lesiones por quemaduras.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir del análisis para determinar el flujo de transferencia de calor, se presentan en la Tabla 4 los tiempos estimados de enfriamiento de las secciones del molde P-0609, sometidas a las nuevas condiciones de la configuración propuesta para modificar la cámara de enfriamiento del área de servicio de REPARACIÓN DE MOLDES de la planta CRISTAR S.A.S, BUGA.

En la Tabla 4 se puede apreciar que el menor tiempo de enfriamiento se presentaría, como era de esperarse, en la sección S2. Dicha sección cuenta con un juego de nueve aletas nodulares, las que facilitan la extracción de calor del molde, con un tiempo de enfriamiento aproximado de 6,23 minutos. En la misma tabla se evidencia que el mayor tiempo de enfriamiento transcurriría para la sección S3, con una duración aproximada de 19 minutos.

Por lo tanto, al cambiar la dirección de ataque del aire sobre el molde, siguiendo las recomendaciones de que este sea cruzado sobre el cuerpo y no en su dirección longitudinal, permite obtener mejores condiciones de transferencia de calor sobre los cuerpos.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo, a partir de la determinación de la capacidad de extracción de calor requerida, un tiempo estimado del enfriamiento del molde P-0609, sometido a las nuevas condiciones de enfriamiento de la cámara de enfriamiento de moldura.

Se evidencia que el tiempo de enfriamiento se reduciría hasta en una tercera parte del que actualmente toma, es decir, una hora, para pasar a un tiempo estimado de 19 minutos*. Lo anterior indica que se al modificar la configuración de la cámara de enfriamiento se estaría haciendo un aporte importante a la eficiencia del taller de REPARACIÓN DE MOLDES, ya que los ajustadores no tendrían que esperar tanto tiempo para iniciar el proceso de pulido de moldura y, por lo tanto, se incrementaría la eficiencia del taller al reducir un tiempo muerto.

Se recomienda entonces pasar de la actual configuración de la cámara de enfriamiento de moldes a la propuesta presentada en este documento.

* Los resultados obtenidos son estimados y se basan en la suposición de que el molde y sus alrededores son cuerpos negros.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rodríguez, M. Aplicación de la metodología seis sigma para el análisis y solución de problemas de calidad en el proceso de preparación y reparación de piezas de moldura para producir cristalería en las máquinas de prensado y soplado de vidrio Hartford 28 de la empresa Cristar S.A (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- [2] Universidad Nacional Experimental del Táchira. [Online] 2015. http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-165.htm [Citado el: 30 de diciembre de 2017].
- [3] INCROPERA, F. P. Fundamentos de transferencia de calor. Edición 4. México: PRENTICE HALL HISPANOAMERICANA, 1999. 886 p.
- [4] Siemens Industry Colombia. [Online] 2013. https://www.industry.siemens.com/home/aan/es/Colombia/Documents/lista_de_precios_colombia.pdf [Citado el: 03 de diciembre de 2017].
- [5] Manual Práctico de Ventilación. Soler & Palau. [Online] 2012. http://www.solerpalau.mx/pdf/sp_ventilacion_c2.pdf [Citado el 27 de diciembre de 2017].
- [6] Cámara termográfica de gama alta TP8. [Online] 2005. <http://www.guideinfrared.es/a3-infrared-camera.html> [Citado el 03 de enero de 2018].
- [7] CENGEL, Y. BOLES, M. Termodinámica. Edición 7. México: MC GRAW HILL, 2012. 1041 p.

10. ANEXOS

Anexo 1. Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica.

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728

Fuente: Tomado de [3].

Anexo 2. Propiedades termofísicas de sólidos metálicos seleccionados.

Propiedades a 300 K						Propiedades a varias temperaturas (K)									
Composición	Punto de fusión (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg · K)	k (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	k (W/m · K)/ c_p (J/kg · K)									
						100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Acero puro	1810	7870	447	80.2	23.1	134 216	94.0 384	69.5 490	54.7 574	43.3 680	32.8 975	28.3 609	32.1 654		
Aceros al carbón															
Carbón ordinario		7854	434	60.5	17.7			56.7 487	48.0 559	39.2 685	30.0 1169				
Si $\leq 0.1\%$															
AISI 1010		7832	434	63.9	18.8			58.7 487	48.8 559	39.2 685	31.3 1168				
Carbón-silicio		7817	446	51.9	14.9			49.8 501	44.0 582	37.4 699	29.3 971				
Mn $\leq 1\%$, 0.1% < Si $\leq 0.6\%$															
Carbón-manganeso-silicio		8131	434	41.0	11.6			42.2 487	39.7 559	35.0 685	27.6 1090				
1% < Mn $\leq 1.65\%$, 0.1% < Si $\leq 0.6\%$															
Aceros con cromo (bajo)															
1Cr-1Mo-Si		7822	444	37.7	10.9			38.2 492	36.7 575	33.3 688	26.9 969				
(0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si)															
1Cr-1Mo		7858	442	42.3	12.2			42.0 492	39.1 575	34.5 688	27.4 969				
(0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si)															
1Cr-V		7836	443	48.9	14.1			46.8 492	42.1 575	36.3 688	28.2 969				
(0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V)															
Aceros inoxidables															
AISI 302		8055	480	15.1	3.91			17.3 512	20.0 559	22.8 585	25.4 606				
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95	9.2	12.6	16.6 515	19.8 557	22.6 582	25.4 611	28.0 640	31.7 682		
AISI 316		8238	468	13.4	3.48	272	402	15.2 504	18.3 550	21.3 576	24.2 602				
AISI 347		7978	480	14.2	3.71			15.8 513	18.9 559	21.9 585	24.7 606				

DEPARTAMENTO DE B
Universidad Simón Bolívar

Fuente: Tomado de [3].

Anexo 3. Ficha Técnica ventilador axial industrial 2CC2 504 5YB6_STD.

Feb. 1/2013

No. de Depósito	Descripción							Precio Lista Unit. - Col. \$(*)
								
	Referencia	Diámetro mm	Caudal m3/s	Potencia kW	Nivel de ruido dB(A)	Corriente (A) 110V		
	Con motor monofásico 110 V, 1.800 RPM							
100138766	2CC2 254 • 5YC3 _ STD	250	0,38	0,05	62	0,80		522.000
100138767	2CC2 314 • 5YC3 _ STD	310	0,70	0,08	65	1,50		562.000
100138768	2CC2 354 • 5YC3 _ STD	350	1,01	0,11	68	1,90		651.000
100138769	2CC2 404 • 5YC3 _ STD	400	1,45	0,22	74	3,20		790.000
100138770	2CC2 504 • 5YA3 _ STD	500	2,93	0,70	78	8,30		1.294.000
	Con motor trifásico, 220/440 V, 1.800 RPM							
100138771	2CC2 404 • 5YD6 _ STD	400	1,45	0,20	74	1,1	0,6	815.000
100138772	2CC2 504 • 5YB6 _ STD	500	2,93	0,66	78	3,0	1,5	1.294.000
100138773	2CC2 634 • 5YB6 _ STD	630	5,33	1,60	87	6,4	3,2	1.842.000
100138774 ¹⁾	2CC1 714 • 5YB6 _ STD	710	8,37	3,58	91	14,0	7,0	2.450.000
	Con motor trifásico, 220/440 V, 1.200 RPM							
100138775	2CC2 506 • 5YB6 _ STD	500	1,91	0,19	68	1,2	0,6	1.302.000
100138776	2CC2 636 • 5YB6 _ STD	630	3,55	0,51	76	2,2	1,1	1.499.000
100138777	2CC2 716 • 5YB6 _ STD	710	5,27	1,20	80	6,7	3,4	1.920.000
								
	Referencia	Diámetro mm	Caudal m3/s	Potencia kW	Nivel de ruido dB(A)	Corriente (A) 110V		
	Con motor monofásico 110 V, 1.800 RPM, con malla de protección ²⁾							
100139168	2CC2 254 • 5YC3 _ STM	250	0,38	0,05	62	0,80		999.000
100139167	2CC2 314 • 5YC3 _ STM	310	0,70	0,08	65	1,50		1.075.000
100139169	2CC2 354 • 5YC3 _ STM	350	1,01	0,11	68	1,90		1.190.000
100139172	2CC2 404 • 5YC3 _ STM	400	1,45	0,22	74	3,20		1.250.000
	Con motor trifásico, 220/440 V, 1.800 RPM, con malla de protección ²⁾							
100139175	2CC2 404 • 5YD6 _ STM	400	1,45	0,20	74	1,1	0,6	1.360.000
100139173	2CC2 504 • 5YB6 _ STM	500	2,93	0,66	78	3,0	1,5	2.110.000
100139171	2CC2 634 • 5YB6 _ STM	630	5,33	1,60	87	6,4	3,2	2.590.000
	Notas: ¹⁾ Los tipos 2CC2 son suministrados con aspa plástica y el tipo 2CC1 con aspa en aluminio ²⁾ Fabricación bajo pedido							
(*) El Precio Lista no incluye IVA vigente • Precios sujetos a cambio sin previo aviso								

Siemens S.A. - Colombia

Fuente: Tomado de [4].

Anexo 4. Ficha Técnica cámara termográfica infrarroja TP8.

	TP8	TP8S
Calidad de la imagen		
Tipo de detector	Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer, 384×288 pixels, 35µm	
Rango espectral	8~14µm	
Campo visual (FOV) Versión B	Lentes estándares 22°×16°/35mm Lentes opcionales de ángulo amplio 33.4°×25.3°/16mm Lentes teleobjetivos opcionales 5.5°×4.1°/100mm	
Sensibilidad térmica	≤0.08°C a 30°C	≤0.08°C (en 30°C, F#=1.0)
Presentación de la imagen		
Pantalla externa	A color VGA LCD de alta resolución de 3.5", 640×480 píxeles	
Visualización de la imagen	Imagen térmica sola/ Imagen visual sola/ Imagen en imagen/InFraFusion	
Medición		
Rango de temperatura	-20°C a 800°C (Hasta +2000°C opcional)	-20°C a 600°C (Hasta +2000°C opcional)
Precisión	±2°C o ±2% de lectura	
Modos de medición	Punto, área, isoterma, perfil de línea, foco caliente automático, alarma automática Foco de cálido/frío automático, alarma automática para temperaturas superiores o inferiores Area visualizando mayor o menor rango de la línea de perfil, delta-t, histograma e isoterma Foco de cálidos en imagen y video en vivo, en zoom, congelada y guardada; aviso automático en imagen y video en vivo y en zoom; 10 spots, 10 áreas móviles y modificables visualizando el perfil de línea máximo, mínimo, promedio, vertical y horizontal; histograma e isoterma en imagen y video en vivo, en zoom, congelada y guardada	
Almacenamiento de imágenes		
Tipo	Tarjeta SD de2GB extraíble o memoria flash integrada	
Anotación de voz	Hasta 60 segundos por archivo	
Localizador Láser		
Clasificación tipo	Láser semiconductor clase 2	
Sistema de alimentación		
Tipo de batería	Batería recargable Li-ion Camcorder, reemplazable en campo	
Duración de la batería	Más de 2.5 horas en funcionamiento continuo	
Especificaciones del entorno		
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 50°C	
Temperatura de almacenamiento	-20°C a 60°C	
Encapsulación	IP54	
Interfaz		
USB 2.0	Transferencia al PC de imágenes y video en tiempo real Control de la cámara en el PC en tiempo real	Transferencia de imágenes al PC
Comunicación RS232	Control de la cámara en el PC	Control de la cámara en el PC
Características físicas		
Tamaño	186mm×106mm×83mm (modelo estándar)	
Peso	1.1kg (con la batería instalada)	

Fuente: Tomado de [6].

Anexo 5. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

TABLA 1.1 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Proceso	h (W/m ² · K)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20,000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100,000

Fuente: Tomado de [3].